

## **Raport stiintific**

*privind implementarea proiectului in perioada octombrie – decembrie 2011*

### **Particule exotice super-masive in telescoape pentru neutrini**

Analiza de nucleariti folosind date experimentale ANTARES din 2007 si 2008

#### **1. Introducere**

Experimentul ANTARES este dedicat astronomiei cu neutrini, in principal cautarii de surse de neutrini cosmici de mare energie [1]. Detectorul este amplasat in Marea Mediterana, la o adancime de 2475 m, la 40 de km sud de orasul francez Toulon si functioneaza in configuratie completa de 12 linii din mai 2008. Detectia luminii Cerenkov emise de particulele relativiste in apa este asigurata de o retea de 885 module optice dispuse cate trei pe fiecare din cele 25 (20) de etaje ale liniilor 1-11 (liniei 12) si orientate la 45 grade sub orizontala. Fiecare modul optic este alcatuit dintr-o sfera de sticla in care se afla un fotomultiplicator Hamamatsu. Fiecare linie este conectata printr-un cablu optic la cutia de jonctiune principala si apoi la statia de pe tarm. O linie de instrumentatie, care colecteaza informatii despre mediul marin si o cutie de jonctiune secundara completeaza experimentul. Datele achizitionate sunt trimise la tarm, conform strategiei "all data to shore", unde sunt filtrate cu diferite triggere si apoi sunt stocate.

Pe langa detectia muonilor relativisti produsi in interactiile neutrinelor ascendenti in apropierea detectorului, pentru care este optimizat, ANTARES ar putea observa si semnalul luminos produs de particule masive exotice, precum monopolii magnetici si nuclearitii [2,3]. In acest raport vom prezenta stadiul cautarii nuclearitilor cu detectorul ANTARES, folosind date achizitionate in 2007 si 2008.

#### **2. Proprietatile nuclearitilor**

In 1984, Witten a prezis existenta unei forme stabile a materiei numita materie stranie, alcatuita din cantitati aproximativ egale de quarci up, down si strange, si care ar putea constitui starea fundamentala a cromodinamicii cuantice [4]. Se presupune ca particulele de materie stranie ar putea fi produse in universul timpuriu [4], sau in evenimente catastrofice din univers (supernovae, ciocniri de stele stranii) [5], cu un domeniu de masa variind intre mase caracteristice nucleelor grele,  $A \approx 300$  GeV, si masa stelelor neutronice,  $A \approx 10^{57}$  GeV. Densitatea estimata a materiei stranii, de  $\rho_N = 3.6 \times 10^{14}$  g cm<sup>-3</sup>, este putin mai mare decat cea a materiei nucleare obisnuite. In acest raport, numim nucleariti particulele stabile de materie stranie cu masa  $M > 10^{10}$  GeV.

In [6] se arata ca diferenta de potential chimic dintre quarcul  $s$  si quarcii  $u$  sau  $d$  induce o mica sarcina reziduala pozitiva a nucleului de materie stranie. In cazul nuclearitilor, sarcina reziduala ar fi neutralizata de un nor electronic sau/si de electroni prezenti in nucleul de materie stranie. Viteza de deplasare a nuclearitilor este  $\beta \approx 10^{-3}$ , viteza caracteristica obiectelor capturate gravitacional in Galaxie.

##### **2.1 Interactia nuclearitilor cu materia**

Nuclearitii non-relativisti interactioneaza predominant prin ciocniri elastice cu atomii mediului traversat, cu pierderea de energie definita de relatia:  $dE/dx = -\sigma\rho v^2$ , unde  $\sigma$  este sectiunea eficace a nuclearitului si  $\rho$  densitatea mediului. Pentru mase  $M \leq 8.4 \times 10^{14}$  GeV, sectiunea eficace are valoarea atomica tipica  $\sigma = \pi \times 10^{-16}$  cm<sup>2</sup>, iar pentru mase mai mari, sectiunea este  $\sigma = \pi \times (3M/4\pi\rho_N)^{2/3}$  cm<sup>2</sup>.

Presupunand ca viteza nuclearitului in afara atmosferei terestre este  $\beta \approx 10^{-3}$ , masa nuclearitului ar trebui sa fie mai mare de  $10^{22}$  GeV pentru a putea traversa pamantul. Deoarece fluxul asteptat de nucleariti din radiatia cosmica descreste cu masa (similar nucleelor grele), vom considera in acest studiu doar nuclearitii descendentii.

## 2.2 Principiul de detectie in ANTARES

Energia emisa prin ciocniri elastice determina supra-incalzirea traiectoriei nuclearitului in materie. In cazul apei, se estimeaza ca o fractiune  $\eta = 3 \times 10^{-5}$  din energia emisa este disipata sub forma de radiatie de corp negru in domeniul vizibil, de catre unda de soc ce se extinde cilindric in jurul traiectoriei. Numarul de fotoni emisi pe unitatea de drum poate fi calculat din relatia:  $dN_\gamma/dx = \eta(dE/dx)/\langle E_\gamma \rangle$ , unde  $\langle E_\gamma \rangle = \pi$  eV este energia medie a fotonilor din domeniul vizibil. Simularile efectuate cu un cod Monte Carlo simplificat au aratat ca nuclearitii cu mase  $M \geq 3 \times 10^{13}$  GeV ar produce suficienta lumina pentru a putea fi detectati de telescopul ANTARES.

## 3. Strategia de cautare

Pentru a creste eficienta analizei, in acord cu regulamentul ANTARES, strategia de cautare a nuclearitilor se bazeaza pe o procedura de "blinding". Aceasta consta in definirea criteriilor de selectie a semnalului folosind simulari Monte Carlo si validarea lor pe o fractiune (15%) din datele experimentale.

### 3.1 Selectia datelor si simulari Monte Carlo

Informatia in ANTARES este structurata in semnale de tip L0 (avand sarcina mai mare decat un prag predefinit) si L1. Un semnal L1 se obtine cand doua semnale L0 sunt detectate pe acelasi etaj in interval de 20 ns, sau cand un semnal cu amplitudine (sarcina) mare (3 fotoelectroni sau mai mult) este detectat de un singur fotomultiplicator. In 2007 si 2008 s-au folosit doua triggeruri de miuoni la achizitia datelor, triggerul directiona (TD) si triggerul cluster (TC). TD necesita cel putin 5 semnale L1 corelate in spatiu si timp, intr-un interval de 2.2  $\mu$ s, caracteristic timpului de traversare a detectorului de catre un miuon relativist. TC necesita clusteruri formate din doua semnale L1, in doua din trei etaje consecutive, intr-un interval de 2.2  $\mu$ s.

Cand un eveniment declanseaza triggerul, toate semnalele provenite de la fotomultiplicatori sunt inregistrate intr-un snapshot, intr-un interval care cuprinde 2.2  $\mu$ s inainte si dupa clusterul de semnale L1.

Datele experimentale din 2007 si 2008 selectate pentru acest studiu indeplinesc un set de criterii de calitate, in principal nivele joase de bioluminiscenta (produsa de diverse organisme marine) si un detector bine calibrat. Ele au fost achizitionate in timpul constructiei detectorului ANTARES, cu diverse configuratii (in 2007 cu 5 linii, iar in 2008 cu 9, 10 si 12 linii). Timpul de achizitie efectiv este de 310 zile, distribuit in functie de configuratie dupa cum urmeaza: 140 zile cu 5 linii, 53 zile cu 10 linii, 47 de zile cu 9 linii si 70 de zile cu 12 linii.

Pentru simularea Monte Carlo a nuclearitilor a fost dezvoltat un program special. Acesta evalueaza emisia de fotoni de-a lungul traiectoriei nuclearitilor, considerand un volum de generare semisferic, cu raza de 548 m, centrat pe axa detectorului si directii de sosire isotropice din emisfera superioara. Au fost simulati nucleariti cu mase in domeniul  $3 \times 10^{13}$ - $10^{17}$  GeV si viteza initiala  $\beta = 10^{-3}$  (inainte de intrarea in atmosfera).

Fondul principal pentru semnalul produs de nucleariti este reprezentat de miuonii atmosferici descendentii. Acestia sunt simulati cu un program numit MUPAGE [7].

Atat nuclearitiile cat si muonii simulati au fost procesati folosind triggerele active si conditiile de achizitie corespunzatoare fiecarei configuratii considerate. Fondul adaugat in timpul procesarii a fost extras dintr-un grup de run-uri experimentale, pentru fiecare configuratie a detectorului.

### 3.2 Conditii de selectie a nuclearitilor

Durata trecerii unui nuclearit prin detector este mult mai mare ( $\approx 1$  ms) decat in cazul miuonilor relativisti ( $\approx 2.2 \mu\text{s}$ ). De asemenea, intensitatea semnalului luminos produs de un nuclearit poate fi cu ordine de marime mai mare decat luminozitatea produsa de un miuon. Triggerele implementate in sistemul de achizitie ANTARES selecteaza semnalele compatibile cu trecerea unui miuon relativist, iar nuclearitiile, fiind particule lente, determina multiple snapshot-uri consecutive.

#### 3.2.1 Primul nivel de selectie

Pentru a separa semnalul produs de nucleariti de fondul miuonilor atmosferici, am folosit ca variabila discriminanta durata evenimentului  $dt$ , definita ca diferenta de timp dintre ultimul si primul semnal L1 inregistrat in snapshot. In figura 1 este prezentata comparatia dintre distributiile duratei  $dt$  pentru nucleariti, muoni simulati si o fractiune de 15% din datele experimentale, pentru configuratia de 5 linii, cu trigger activ TD si prag L1 de 3 fotoelectroni (pe). Linia verticala (in dreptul duratei de 3250 ns) reprezinta valoarea optimizata a conditiei de selectie C1 pentru aceasta configuratie.

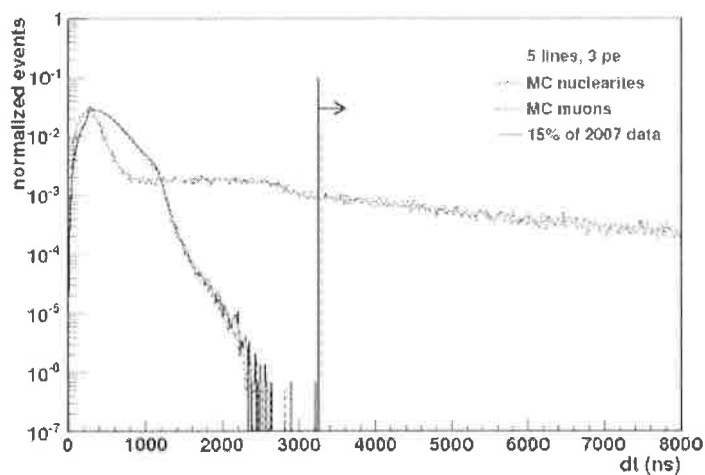


Figura 1. Distributiile duratei  $dt$  pentru nucleariti simulati (linie punctata), muoni simulati (linie segmentata) si date experimentale (linie continua), obtinute pentru configuratia cu 5 linii, cu prag L1 de 3 pe. Linia verticala reprezinta valoarea optima a conditiei de selectie C1 pentru aceasta configuratie.

Toate configuratiile au fost analizate intr-un mod similar, cu verificarea acordului dintre datele experimentale si simularile MC de muoni atmosferici, apoi au fost definite conditii de selectie optimizate, astfel incat limita superioara de flux, care s-ar obtine in cazul in care niciun eveniment de nuclearit nu este detectat, sa fie minima.

Conditiiile C1 obtinute au fost testate pe fractiuni de 15% din datele experimentale, corespunzatoare fiecarei configuratii. Pentru cele unsprezece evenimente ramase dupa selectie, am studiat evolutia in timp a centrului de greutate al sarcinii. Deoarece nuclearitiile emit lumina izotrop, centrul de greutate al sarcinii ofera o estimare a pozitiei sursei la un moment dat. Toate evenimentele ramase din datele experimentale au fost consistente cu surse de lumina statice, si au fost interpretate ca fiind produse de explozii de bioluminiscenta.

### 3.2.2 Al doilea nivel de selectie

Evenimentele ramase dupa primul nivel de selectie sunt evenimente cu un singur snapshot. Pentru a reduce fondul produs de bioluminiscenta, am introdus a doua conditie de selectie C2, care va fi aplicata doar evenimentelor cu un singur snapshot, si va selecta evenimentele cu o durata  $dt$  mai mare decat dublul valorii conditiei C1. Dupa acest al doilea cut, niciun eveniment din fractiunea de 15% din datele experimentale nu a supravietuit.

## 4. Rezultate

Dupa ce strategia de selectie a fost aprobata in cadrul Colaborarii ANTARES, am primit permisiunea de a analiza restul de 85% din datele experimentale colectate in 2007 si 2008. Analiza a parcurs etapele predefinite, datele au fost filtrate prin aplicarea conditiilor de selectie corespunzatoare.

Doar patru evenimente au ramas dupa aplicarea conditiilor de selectie, din care niciunul nu apartine fondului de miuoni atmosferici descendenti. Topologia acestor evenimente a fost investigata folosind distributia centrului de greutate al sarcinii in timp. Studiul a aratat ca evenimentele ramase nu sunt compatibile cu ipoteza unei particule lente descendente; ele pot fi interpretate ca datorate bioluminiscentei.

In consecinta, am calculat limita superioara de flux cu 90% C.L. pentru nucleariti descendenti, folosind datele colectate de ANTARES in 2007 si 2008. Resultatul obtinut este prezentat in figura 2 si este comparat cu limita MACRO [8] si limita SLIM [9]. Limitele din figura 2 au fost obtinute folosind aceeasi ipoteza: se presupune ca nuclearitii intra in atmosfera cu o viteza de 300 km/s si provin doar din atmosfera superioara.

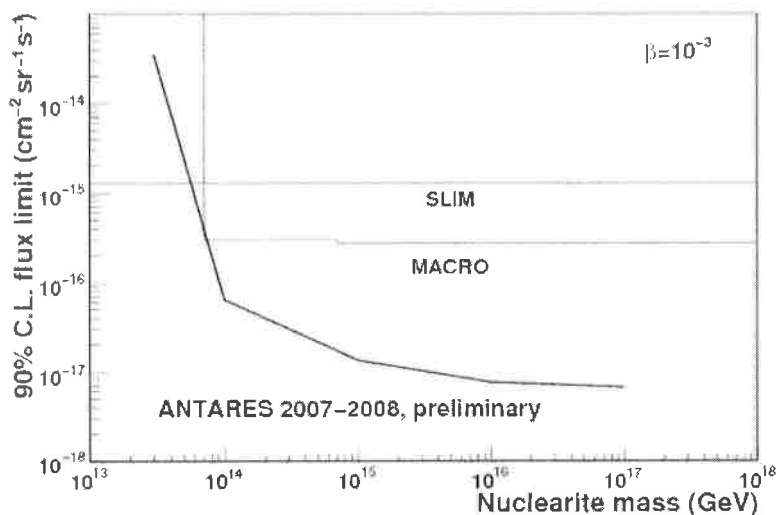


Figura 2. Limitele superioare de flux cu 90% C.L. pentru nucleariti descendenti, obtinute cu datele ANTARES din 2007 si 2008, comparate cu limitele finale obtinute de MACRO si SLIM.

Reamintim ca MACRO a fost un detector subteran care a functionat la Laboratorul National Gran Sasso al INFN (Italia), iar SLIM a fost un detector pasiv instalat la mare altitudine, la Laboratorul de raze cosmice Chacaltaya (Bolivia).

Limita preliminara ANTARES imbunatateste semnificativ rezultatul MACRO in domeniul de masa comun; pentru nucleariti cu mase mai mici de  $5 \times 10^{15}$  GeV limita obtinuta de SLIM ramane cea mai buna.

## 5. Concluzii

Am prezentat strategia de cautare a nuclearitilor descendenti si rezultatele obtinute din analiza datelor ANTARES din 2007 si 2008. Niciun eveniment candidat nu a fost gasit. Au fost obtinute limite superioare ale fluxului de nucleariti descendenti, care in prezent sunt cele mai bune in domeniul de masa  $10^{14}$ - $10^{17}$  GeV.

### Bibliografie:

- [1] J.A .Aguilar et al. (ANTARES Collaboration), Nucl. Instr. Meth. A 656 (2011) 11-38, arXiv: 1104.1607
- [2] V. Popa (for the ANTARES Collaboration), Nucl. Instr. Meth. A 567 (2006) 480-482
- [3] G. Pavalas, N. Picot-Clemente (for the ANTARES Collaboration), Proceedings of the 31<sup>st</sup> ICRC, Lodz, 2009, arXiv: 0908.0860
- [4] E. Witten, Phys. Rev. D 30 (1984) 272
- [5] J. Madsen, Phys. Rev. D 71, 014026 (2008)
- [6] A. De Rujula, S.L. Glashow, Nature 312 (1984) 734
- [7] G. Carminati et al., Comput. Phys. Commun. 181 (2010) 835-836
- [8] M. Ambrosio et al. (MACRO Collaboration), Eur. Phys. J. C 13 (2000) 453-458
- [9] S.Cecchini et al. (SLIM Collaboration), Eur. Phys. J. C 57 (2008) 525-533

Director proiect,

Dr. Vlad Popa

